

# Emissions au champ de pesticides vers l'air en conditions tropicales

## Etat de l'art et perspectives de recherche

Mai 2016

Projet de recherche coordonné par : *CIRAD, INRA, IRSTEA*

N° de contrat : 14-60-C0083

**Coordination technique :** *Eglin Thomas et Colomb Vincent* – **Direction\Service :** *DPED/SAF*



**RAPPORT FINAL**



## Remerciements

Aux différents stades de l'élaboration de cette synthèse, plusieurs personnes m'ont apporté un appui précieux et je tiens à les en remercier chaleureusement.

Tout d'abord je souhaite remercier l'équipe DRS-DIST du CIRAD tout particulièrement Alain Glarmet pour la réalisation du travail de recherche bibliographique dans les bases de données ainsi qu'Emilie Chirouze et Annie Boyer pour leur appui. Ensuite, je dois remercier Jean-Paul Douzals pour le temps d'échange qu'il m'a accordé et les documents qu'il m'a transmis sur la situation de la dérive des pesticides en systèmes bananiers aux Antilles. Je remercie Carole Sinfort pour son expertise sur la dérive et les discussions où elle m'a aidé à comprendre et interpréter les travaux publiés sur ce thème. Je remercie mes collègues de l'unité Hortsys du CIRAD : Fabrice Le Bellec, Charles Mottes, Magalie Jannoyer et Henri Vannière pour leur aide sur la connaissance des pratiques phytosanitaires dans les DOM, la fourniture de documents clés sur ce thème et leurs avis d'experts de terrain. Je remercie Carole Bedos pour sa relecture éclairée de ce rapport, nos échanges forts instructifs pour moi et son avis d'experte sur la modélisation des émissions vers l'air. Enfin, je remercie Thomas Eglin de l'ADEME pour son suivi rigoureux et sa relecture finale du rapport.

## CITATION DE CE RAPPORT

**Basset-Mens C. 2016.** Emissions au champ de pesticides vers l'air en conditions tropicales – Rapport final. ADEME. 31p

*Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.*

## TABLE DES MATIERES

Remerciements 2

1. Introduction : enjeux et cadre de l'étude 4

Enjeux et risques 4

Périmètre, cadre de l'étude et objectifs 9

2. Matériels et méthodes 9

La consultation d'experts 9

Constitution d'un fond documentaire sur les mesures et modèles d'estimation au champ en conditions tropicales 10

3. Résultats : analyse de l'existant 11

Etat de l'art des mesures au champ : quelle exploitation opérationnelle ? 11

La spécificité des conditions tropicales est présente dans la littérature 11

La dérive 12

La volatilisation 20

Exhaustivité et valorisation du fond documentaire 21

Analyse de la validité des modèles existants pour les conditions tropicales 25

Facteurs d'émission 25

Relations et modèles empiriques 25

Modèles mécanistes 25

Modèles d'estimation des flux de pesticides au champ utilisés en ACV : le modèle PestLCI 26

4. Conclusion et perspectives de recherche 26

5. Références bibliographiques 27

# 1. Introduction : enjeux et cadre de l'étude

## Enjeux et risques

L'usage des pesticides au sud rencontre des situations très contrastées : depuis des cultures dites « biologiques par défaut », c'est-à-dire sans apport de pesticides faute de moyens pour les acheter, jusqu'à des cultures urbaines où la gestion des bio-agresseurs est mal maîtrisée et associée le plus souvent à des apports excessifs, en passant par des cultures d'export intensives et relativement bien encadrées. La situation dans les DOM est très spécifique puisque ces territoires au climat tropical sont soumis aux réglementations européennes et souffrent à la fois d'une forte pression parasitaire et d'une pénurie de molécules homologuées. De plus, alors que les pays tempérés tentent de réduire leurs usages en produits phytosanitaires, les pays du sud voient leurs usages augmenter avec l'augmentation de leurs moyens. Alors que de nombreuses molécules qui présentent des risques importants pour l'environnement sont progressivement bannies dans les pays riches, les pays du sud développent la production de ces mêmes « vieilles » molécules dont les brevets sont caduques et les vendent en masse et à bas prix à des agriculteurs souvent très peu formés, plutôt que les nouvelles molécules moins toxiques mais aussi beaucoup plus onéreuses (Sanchez-Bayo et Hyne, 2011). Si l'on exclut la situation des cultures sans traitement pesticides, la question de la qualité des pratiques phytosanitaires dans les autres contextes tropicaux et de leurs transferts et impacts associés se pose donc aujourd'hui de façon critique.

### *Les filières d'export vers la France*

De nombreuses filières de fruits et légumes importés de pays du sud et des départements d'outre-mer se sont structurées et approvisionnent aujourd'hui les marchés du Nord : Etats-Unis et Europe notamment. On citera par exemple le cas des agrumes du Maghreb, de la banane des Antilles, d'Afrique et d'Amérique Centrale, de la mangue du Brésil ou du Sénégal, de la tomate du Maroc, de l'ananas du Costa-Rica (Ingwersen, 2012), de l'ananas Victoria de l'île de La Réunion. En Afrique, le Kenya et la Côte d'Ivoire sont devenus deux des principaux pays exportateurs de produits horticoles dans le monde. Dans de nombreux pays d'Afrique, l'horticulture d'export (surtout les légumes et les fleurs coupées) est devenue un secteur plein de promesses dans un paysage agricole maussade (Weinberger et Lumpkin, 2007). Ces systèmes dont les produits sont destinés à des marchés exigeants sont très encadrés et font souvent l'objet de démarche qualité et de certification (GLOBALGAP). Ils ont également souvent des moyens financiers conséquents et embauchent des gestionnaires d'exploitation diplômés qui raisonnent les apports d'intrants en fonction des rendements espérés. Cependant, la demande de ces produits horticoles au Nord a souvent entraîné un développement et une intensification des systèmes de culture associés à des impacts sur les écosystèmes locaux et sur la population (Ingwersen, 2012). Ces filières dynamiques sont conscientes de l'évolution des réglementations et des demandes sociales dans les pays du Nord. Dans ce cadre, elles sont réceptives à, voire anticipent parfois, la demande d'évaluation globale de leurs produits à la fois sur le plan environnemental et social. Quand la demande en évaluation globale ne vient pas de ces producteurs pour se démarquer, elle provient des marchés eux-mêmes que ce soit au travers d'incitations publiques comme la loi Grenelle 2 sur l'affichage environnemental en France ou d'acteurs privés comme la grande distribution.

### *L'agriculture urbaine au sud*

D'ici 2030, 60% de la population mondiale vivra en ville (United Nations, 2012). Dans un contexte de croissance démographique urbaine très rapide dans les pays en développement et notamment en Afrique sub-saharienne, l'agriculture urbaine en général et l'horticulture urbaine en particulier sont présentées comme ayant un gros potentiel pour créer des emplois, générer des revenus, assurer la sécurité alimentaire des citadins et la préservation de leur environnement (FAO, 2012 ; World Bank, 2013 ; Orsini et al. 2013). Concernant l'horticulture urbaine et périurbaine, la contribution à la fourniture en fruits et légumes des habitants des villes est souvent très élevée (jusqu'à 80%) mais ces systèmes souffrent de très nombreuses contraintes et de très peu de soutien de la part des pouvoirs publics (Eriksen-Hamel et Danso, 2010). Cissé et al (2005) dénoncent leur statut légal incertain qui contraste avec la multitude d'acteurs qui interviennent dans leur promotion et leur développement. La contrainte la plus critique de ces systèmes et la plus révélatrice de ce manque de reconnaissance officielle est l'absence de sécurité foncière des producteurs. Dans les systèmes horticoles urbains et périurbains prédominent des cultures à cycle court (maraîchage surtout) et des arbres fruitiers qui ont une forte demande en nutriments et en eau et qui sont très vulnérables aux attaques des ravageurs et maladies. Ces systèmes sont soumis à des contraintes de production spécifiques et importantes,

telles que la pression foncière, un environnement de production souvent pollué (sol, air, eau), une demande en recyclage de déchets organiques et d'eaux usées, une pression parasitaire élevée (De Bon et al. 2010 ; Eriksen-Hamel et Danso, 2010).

Dans ce contexte, ces systèmes ont connu une intensification forte, souvent mal maîtrisée, dont les excès et les risques pour l'environnement et la santé humaine commencent à être dénoncés dans la littérature (De Bon et al. 2010 ; Ahouangninou et al. 2012). Dans un contexte où le niveau d'éducation et de formation des producteurs est très faible, de mauvaises pratiques phytosanitaires ont été mises en évidence, comme l'usage de molécules interdites sur maraîchage, de produits achetés au marché noir ou reconditionnés sans notice, des traitements systématiques, excessifs et inappropriés, l'application sans protection par les producteurs, le non-respect du délai avant récolte (Ahouangninou et al. 2011 ; De Bon et al. 2010 ; De Bon et al. 2014). Des pollutions de nappes par les pesticides ont même été observées dans différentes régions africaines comme la région des Niayes au Sénégal (Cissé et al. 2003) et en Côte d'Ivoire (Traoré et al. 2006). Perrin (2013) a également mis en évidence dans le cadre d'une Analyse de Cycle de Vie, les excès des pratiques phytosanitaires (forts IFT, usages d'insecticides toxiques) et leurs impacts potentiels associés sur la santé humaine et l'écotoxicité pour la tomate en jardin urbain au Sud du Bénin. Des innovations techniques sont proposées comme les filets anti-insectes (Taylor et al. 2001 ; Gogo et al. 2014) ainsi que des pratiques agro-écologiques qui présentent des atouts prometteurs sur les plans agronomiques et économiques mais aussi nécessitent un processus d'adoption qui peut être plus ou moins facile (Abate et al. 2000).

#### *La situation des départements d'outre-mer français*

La situation des DOM est tout aussi spécifique et mérite qu'on s'y arrête. En tant que régions françaises, les DOM font officiellement partie de l'Europe et sont donc soumis aux mêmes réglementations que les autres pays européens et que la métropole en particulier. Cependant, leur climat, la diversité et la nature de leurs productions, leurs sols sont très différents de ceux des zones continentales tempérées. Ces contextes sont souvent propices au développement des bio-agresseurs et à l'invasion des mauvaises herbes, avec un climat chaud et humide toute l'année sans rupture de cycle pour les pathogènes et insectes. Ils souffrent de plus d'un manque de molécules phytosanitaires homologuées parce que leurs surfaces cultivées sont trop faibles pour motiver la constitution d'un dossier d'homologation spécifique par les firmes phytopharmaceutiques. Il en résulte soit une recherche de pratiques alternatives agro-écologiques ou biologiques, soit des usages détournés de produits phytosanitaires dont les impacts sur la santé humaine et l'environnement n'ont pas encore été évalués. Le scandale de la pollution durable des sols et des eaux à la Chlordécone en Martinique et en Guadeloupe, est une des conséquences dramatiques de cette situation et pour longtemps. Cette molécule, perturbateur endocrinien avéré, neurotoxique classée cancérogène possible en 1979, et bannie en métropole en 1990 avait bénéficié d'une dérogation spéciale pour les DOM et a donc été épanchée de 1972 à 1993 sur la banane des Antilles. Sa diffusion par dissolution dans les eaux et par adsorption sur les particules de sols érodés se poursuit aujourd'hui dans tous les compartiments de l'environnement et pour des décennies voire des siècles et contamine la chaîne alimentaire.

Des données sur les quantités de pesticides utilisées dans les DOM existent notamment sur la Banque Nationale des Ventes par les Distributeurs (BNV-D). Dans le cadre du projet Pres'AgriDom plusieurs collègues de l'unité Hortsys ont encadré en 2015 des stages pour construire un indicateur de pression phytosanitaire dans les DOM et ces travaux incluent un inventaire des quantités de produits phytosanitaires consommés par DOM basé sur des extractions de la BNV-D. D'après Maistre (2015), « la gestion de la BNV-D est confiée à l'ONEMA, mais, dans les DOM, les acteurs principaux sont les Offices de l'eau (ODE) qui calculent notamment le montant de la redevance pollution diffuse pour chaque distributeur et qui réalisent ainsi le suivi des ventes sur leur département ». Cependant, ces données, en partie confidentielles, ne sont pas directement accessibles et nécessitent de connaître localement un relai (comme la DAAF) qui accepte de donner une extraction de cette base de données. Dans son rapport, Justine Boussier donne un schéma de la chaîne de production des données de cette base (Figure 1).

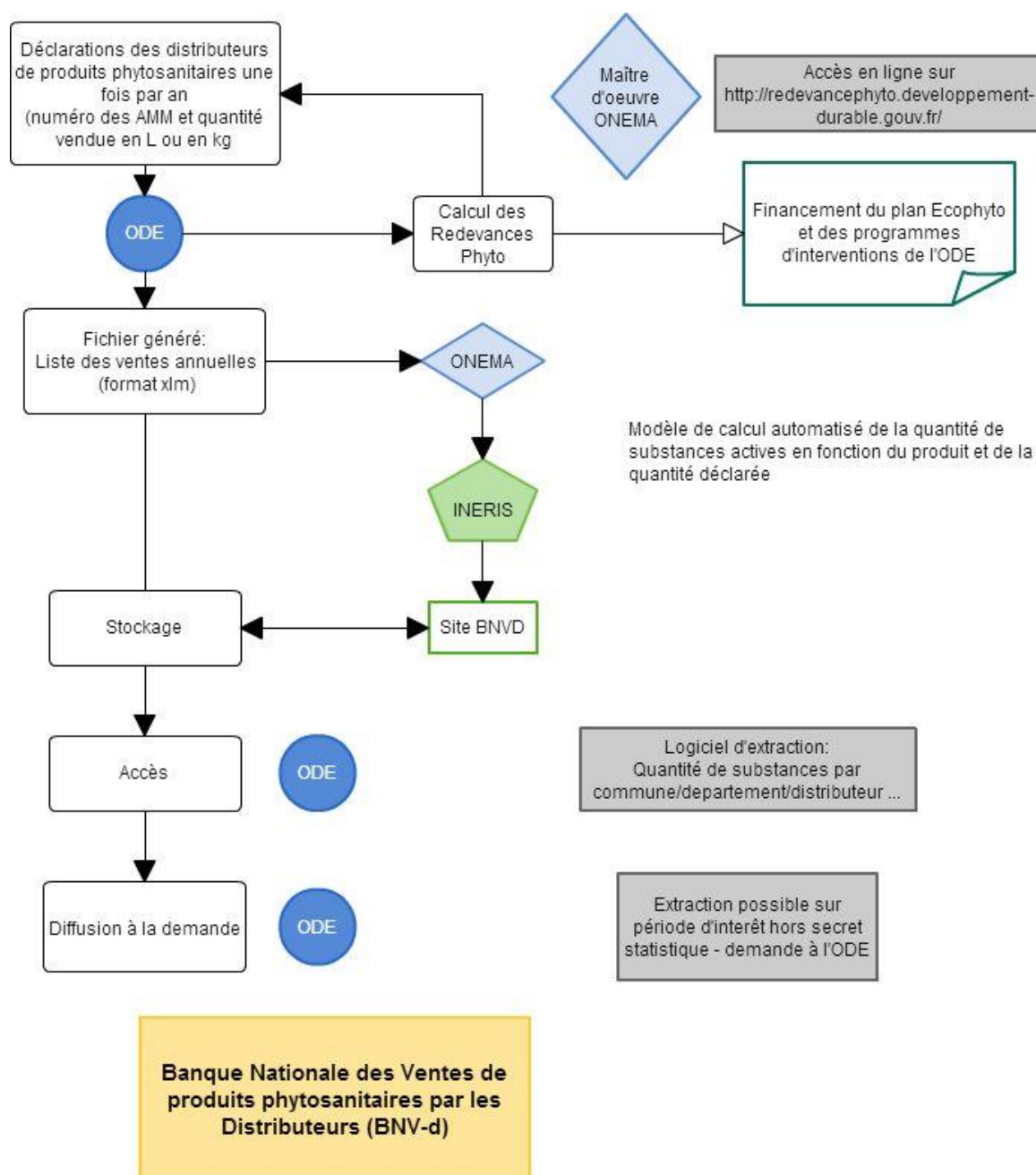


Figure 1. Chaîne de production de la donnée BNV-d (banque nationale de vente des distributeurs), extraite du rapport de Boussier (2015).

Globalement, on constate que les herbicides représentent la grande majorité des produits vendus sur l'ensemble des DOM (entre 72% en Guyane et 81% en Guadeloupe) avec comme principales molécules utilisées le glyphosate et le 2,4-D. C'est la culture de la canne à sucre qui est le plus gros consommateur d'herbicides pour la gestion des adventices. Les fongicides arrivent généralement en second. Dans l'ensemble des DOM, un nombre assez limité de substances constitue environ 90% des molécules vendues : entre 10-11 en Guadeloupe et Martinique, 15 à La Réunion et 18 en Guyane. Issus du rapport de Lefèvre (2015), un tableau et une figure présentant les 11 molécules les plus utilisées en Martinique sont présentés ci-dessous pour exemple. Des figures et tableaux équivalents pour les autres DOM existent dans les différents rapports de stage.

D'après le rapport d'Ormenecy (2015), la situation semble plus complexe en Guyane que dans les autres DOM. « Premièrement, l'utilisation de produits non autorisés sur le territoire français est courante en Guyane. En effet, les pays frontaliers n'étant pas soumis aux mêmes réglementations/homologations que l'Union Européenne, de nombreux agriculteurs guyanais se fournissent aux frontières en produits moins coûteux et parfois plus efficaces. De par l'illégalité de cette pratique, il n'est pas possible d'évaluer précisément les quantités de produits illégaux utilisés sur le territoire

(ORSG, 2010). Deuxièmement, le détournement d'usage est une pratique très courante en raison du peu d'homologation des produits français pour les cultures tropicales (principalement pour les insecticides et fongicides) (entretien DAAF). D'autre part, le manque de connaissances des agriculteurs relatives aux pratiques phytosanitaires amène très régulièrement à des soucis de surdosages et de non-respect des taux de dilution et des consignes (entretien DAAF). » Les données issues de la BNV-D ne tiennent pas compte de ces usages illégaux.

Tableau 1. Usages des 11 substances actives les plus vendues en Martinique (Source: e-phy, BNV-D 2012-2014)

Substances	Somme des Quantités vendues (Kg)					% Vente Totale	Type	Culture	Usages
	Agriculture	%	Jardin (EAJ)	%	Total général				
Total général	151469,242	76,19	47322,83064	23,81	198792,0727	100			
glyphosate	58888,434	58,68	41469,16016	41,32	100357,5942	50,48	Herbicide	Banane, Maraichage	Adventices
glufosinate ammonium	25256,85	100,00		0,00	25256,85	12,71	Herbicide	Banane, Maraichage	Adventices
asulame	11064	100,00		0,00	11064	5,57	Herbicide	Canne à sucre	Adventices
2,4-d	8655,254	97,70	204,0768	2,30	8859,3308	4,46	Herbicide	Canne à sucre	Adventices
difenoconazole	8429,8125	99,98	1,8861389	0,02	8431,698639	4,24	Fongicide	Banane, Maraichage	Cercosporiose
fosthiazate	7551	100,00		0,00	7551	3,80	Nématicide	Banane	Nématodes et Charençons
s-metolachlore	7280	100,00		0,00	7280	3,66	Herbicides	Canne à sucre	Adventices
diquat	3100	100,00		0,00	3100	1,56	Herbicide	Banane	Adventices
propiconazole	2970	99,99	0,26293	0,01	2970,26293	1,49	Fongicide	Banane	Cercosporiose
imazalil	2642,1	100,00		0,00	2642,1	1,33	Fongicide	Banane	Maladies d'entreposage
mancozebe	1885,9	77,75	539,65	22,25	2425,55	1,22	Fongicide	Maraichage	En culture
Autres	13745,89154	72,91	5107,794613	27,09	18853,68615	9,48			

### Les 11 substances les plus vendues en Martinique (2012-2014)

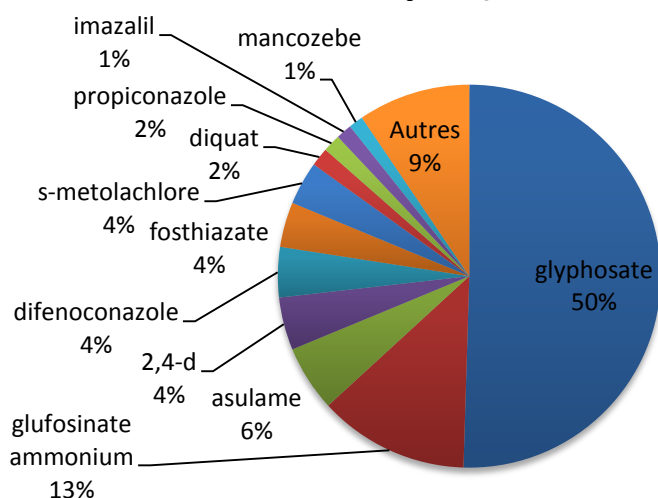


Figure 2. Les 11 substances actives les plus vendues en Martinique entre 2012 et 2014 (données ODE - BNVD 2012-2014)

Après vérification dans la base de données du logiciel SIMAPRO, 72% des molécules ont un facteur de caractérisation USETOX pour l'écotoxicité aquatique, 56% ont un facteur de caractérisation USETOX pour la toxicité humaine, hors-cancer, et aucune des molécules n'a de facteur pour la toxicité humaine, cancer.

Tableau 2. Liste des molécules pesticides les plus utilisées dans les DOM et facteurs de caractérisation USETOX

Molécules		Type de pesticide	Facteurs de caractérisation USETOX		
			Human toxicity, Cancer (CTUh <sup>α</sup> /kg)	Human toxicity, non-cancer* (CTUh <sup>α</sup> /kg)	Aquatic Ecotoxicity* (CTUe <sup>β</sup> /kg)
1	Glyphosate	HB	-	2,22E-8 - 1,60E-7	13,4 - 321
2	Glufosinate ammonium	HB	-	7,34E-8 - 2,52E-6	8,89 - 579
3	Asulame	HB	-	1,90E-7 - 8,31E-7	13 - 216
4	2,4-d (2,4-dichlorophénoxyacétique)	HB	-	8,52E-7 - 3,80E-6	103 - 860
5	Difenoconazole	FG	-	-	1,92E3 - 1,19E5
6	Fosthiazate	NM	-	-	-
7	S-metolachlore	HB	-	-	-
8	Diquat	HB	-	5,70E-8 - 2,89E-5	147 - 7,37E4
9	Propiconazole	FG	-	2,15E-7 - 1,68E-5	285 - 2,23E4
10	Imazalil	FG	-	6,21E-8 - 1,03E-5	81,1 - 1,63E4
11	Mancozebe	FG	-	7,31E-8 - 2,18E-6	296 - 5,22E4
12	2,4-mcpa	HB	-	-	-
13	Metam-sodium	FG	-	-	1,01E3 - 5,56E4
14	Penoxsulame	HB	-	-	-
15	Metaldehyde	ML	-	-	4,32 - 246
16	Fipronil	IN	-	5,26E-6 - 0,000327	1,17E4 - 2,01E6
17	Huile de vaseline	IN	-	-	-
18	Alphamethrine	IN	-	-	-
19	Deltamethrine	IN	-	1,80E-8 - 5,98E-6	1,41E3 - 2,48E6
20	Cyhalofop butyl	HB	-	-	-
21	Chlorpyrifos-ethyl	IN	-	5,53E-6 - 0,000506	9,53E3 - 6,21E6
22	Piclorame	HB	-	2,61E-7 - 7,78E-7	966 - 3,20E3
23	Sulfate de cuivre (chiffres présentés pour le cuivre)	FG	-	4,55E-7 - 3,74E-5	2,31E4 - 5,52E4
24	Azoxystrobine	FG	-	-	820 - 7,31E4
25	Dicamba	HB	-	5,31E-7 - 2,10E-6	339 - 1,89E3
26	Oxamyl	IN, NM, AC	-	1,41E-6 - 4,16E-6	1,55E3 - 1,62E4
27	Metribuzine	HB	-	3,12E-7 - 1,55E-6	659 - 9,49E3
28	Soufre (acide sulfurique présent dans la base)	FG	-	-	-
29	Pendiméthaline	HB	-	5,68E-9 - 6,13E-7	2,43E3 - 4,58E5
30	Mésotrione	HB	-	-	-
31	Fluroxypyr	HB	-	-	474 - 2,92E3
32	Cypermethrine	IN	-	9,92E-9 - 4,41E-6	7,01E4 - 5,04E7

α : CTUh = Comparative Toxic Units for human toxicity ; CTUe = Comparative Toxic Unit for ecotoxicity.  $CTUh = \text{cases.kg emitted}^{-1}$ .  $CTUe = \text{PAF.m}^3.\text{d.kg emitted}^{-1}$ .

\* : la fourchette correspond aux compartiments d'émission hormis le compartiment océan qui donne des Facteurs de Caractérisation généralement beaucoup plus faibles et n'est pas présenté.

*Des spécificités de conditions de climat, de sol et des cultures tropicales... aux différences de comportement des molécules et de devenir dans l'environnement*

Qu'il s'agisse de filières d'export ou de jardins urbains, dans un département d'outre-mer ou dans un pays du sud, l'application de produits phytosanitaires en contexte tropical va être soumise à des conditions de climat, de pratiques et de sols très spécifiques et surtout très différentes des conditions et contextes tempérés dans lesquels la majorité des mesures et modèles d'émission ont été développés. Comme rappelé par Sanchez-Bayo et Hyne, (2011) dans leur étude comparative des risques environnementaux liés aux pesticides entre contextes tropicaux et non tropicaux, les régions tropicales s'étendent entre les tropiques du Cancer et du Capricorne (23.4°N et 23.4°S) où les conditions environnementales (en dehors des régions tropicales arides) sont caractérisées par des



températures allant de 20 à 30°C et des précipitations annuelles supérieures à 700 mm (et même supérieures à 3000 mm dans les tropiques humides). Des événements pluviométriques intenses y sont observés qui peuvent résulter en une perte de la couche fertile supérieure du sol. De plus, les teneurs en matière organique peuvent être faibles en raison de la forte dégradation microbienne tout au long de l'année.

D'autres auteurs ont mis en avant la spécificité des couverts végétaux, en termes de morphologie, d'architecture, de surface foliaire (Sousa Alves et Arantes Rodrigues da Cunha, 2014).

Les pratiques sont d'une extrême diversité puisqu'elles vont de modes d'application aériens (passage d'avions sur des grandes plantations de canne à sucre par exemple) à des modes d'application manuels avec des pulvérisateurs à dos ou des pulvérisateurs ULV (disque rotatif) sur de petites surfaces de maraîchage ou sur coton par exemple. Toute la gamme intermédiaire existe avec des pulvérisateurs à rampes ou à ventilateurs, des pulvérisateurs à dos motorisés ou des pulvérisateurs pistolets à très forte pression.

Pour conclure, on constate une très grande diversité de contextes entre les DOM, en pénurie de molécules homologuées et forcés à rechercher des solutions alternatives (cf. guide tropical, Bruchon et al., 2015) et les pays du sud où l'emploi de vieilles molécules polluantes et sans formation ni précaution des utilisateurs est très problématique.

## **Périmètre, cadre de l'étude et objectifs**

Sur la commande de l'ADEME, cette étude s'inscrit dans une étude plus vaste sur les émissions de pesticides vers l'air conduite conjointement par le l'unité mixte de recherche ECOSYS de l'INRA de Paris-Grignon, l'UMR ITAP de l'Irstea à Montpellier et le CIRAD (Guiral et al., 2016). L'étude ici présentée concerne l'état de l'art des connaissances et approches disponibles pour estimer les émissions de pesticides vers l'air en se focalisant sur les conditions de production agricole tropicale notamment dans les DOM.

Elle vise à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les approches (mesures expérimentales, modèles, expertises) disponibles pour estimer les émissions de pesticides vers l'air en contexte tropical ?
- Quels sont les besoins en recherche pour permettre une estimation valide de ces émissions

## **2. Matériels et méthodes**

La stratégie pour répondre à ces questions a consisté à explorer les approches disponibles grâce à la constitution d'un fond documentaire ainsi qu'à la consultation d'experts. L'idée était d'identifier et d'évaluer :

- La connaissance disponible sur les émissions vers l'air en contexte tropical notamment grâce à des mesures expérimentales reportées dans la bibliographie
- L'existence ou non de modèles d'émission dédiés au contexte tropical et présentés dans la bibliographie
- La validité des facteurs d'émission existants pour le contexte tempéré tels que présentés dans le rapport de Guiral et al. (2016)
- La validité et/ou la marge d'adaptabilité des modèles disponibles (y compris modèles d'inventaire utilisés en ACV) pour les contextes tempérés tels que présentés dans le même rapport

### **La consultation d'experts**

Plusieurs experts ont été consultés pour m'aider à analyser certaines publications et la pertinence des modèles existants pour les conditions tropicales. C'est le cas de Carole Sinfort de l'IRSTEA qui m'a aidé à comprendre certaines publications sur la dérive. C'est aussi le cas de Carole Bedos de l'INRA avec qui j'ai construit ma compréhension de la validité des modèles existants pour les conditions tropicales au cours de plusieurs échanges. J'ai également eu l'occasion d'échanger avec Jean-Paul Douzals de l'IRSTEA sur le programme OPTIBAN, l'un des très rares programmes de mesure de dérive en conditions tropicales mais dont les différents rapports sont aujourd'hui confidentiels pour diverses raisons. Enfin, plusieurs collègues du CIRAD : Magalie Jannoyer, Henri Vannière, Charles

Mottes et Fabrice Le Bellec ont aidé à analyser et comprendre la situation des DOM en termes de gestion des bioagresseurs.

## **Constitution d'un fond documentaire sur les mesures et modèles d'estimation au champ en conditions tropicales**

Le fond documentaire a été constitué avec l'appui de la DIST du CIRAD, notamment par Alain Glarmet qui a effectué une recherche dans les bases de données par mots clés : OVID (CAB abstract + Agris + Agricola) de 1972 à nos jours. La description du contenu de ces bases de données se trouve à l'adresse suivante : <http://intranet-dist.cirad.fr/ressources-et-bibliotheques/ressources-electroniques>

Au tableau 3 sont donnés les mots-clés utilisés pour les différents champs d'importance séparément puis leur intersection pour cette recherche.

Tableau 3. Mots-clés utilisés par champ de la recherche bibliographique et intersection analysée

Ensemble A : compartiment air	(drift or "exo-drift" or "endo-drift" or atmospher* or air or airborn* or "air-born*" or aerial or emission* or emit* or evaporat* or volatili* or "wind erosion").ti,de. [mots-clés utilisés dans les champs (zones) titre et descripteur]
Ensemble B : pesticides	(hh* or h10 or h20 or h60 or h000).cc. [ces codes correspondent à "la section pesticides" dans les différentes bases de données]
Ensemble C : pollution	(pollution or degradation).mp. [mots-clés utilisés dans les champs titre, descripteur, résumé]
Ensemble D : contexte tropical	(tropic* or "southern?afrika" or "south?afrika" or botswana or lesotho or namibia or swaziland or libya or "east?afrika" or djibouti or ethiopia or eritrea or sudan or somalia or kenya or rwanda or uganda or burundi or tanzania or malawi or zambia or mozambique or zimbabwe or madagascar or "reunion?island" or mauritius or mayotte or seychelles or comoros or "central?afrika" or angola or cameroon or "central?afrika?republic" or centrafricque or congo or gabon or "equatorial?guinea" or "sao?tome" or chad or zaïre or "west?afrika" or benin or "burkina?faso" or ghana or mali or mauritania or niger or senegal or togo or "western?sahara" or "cape?verde" or gambia or guinea or "guinea?bissau" or liberia or nigeria or "sierra?leone" or "south?asia" or bangladesh or india or maldives or pakistan or "sri?lanka" or "south?east?asia" or brunei or burma or cambodia or lao or vietnam or "viet nam" or thailand or kampuchea or indonesia or bali or java or sumatra or timor or singapore or malaysia or philippines or "far?east?asia" or china or "hong?kong" or macao or taiwan or caribbean or "anguilla?island" or antigua or bahamas or barbados or cuba or dominica or "dominican?republic" or grenada or guadeloupe or haiti or jamaica or martinique or montserrat or "netherlands?antilles" or "puerto?rico" or "santa?lucia" or "trinidad?and?tobago" or aruba or bonaire or curaco or "turks?and?caicos" or "leeward?islands" or "virgin?islands" or "windward?islands" or "cayman?islands" or "central?america" or belize or "costa?rica" or "el?salvador" or guatemala or honduras or nicaragua or panama or mexico or "south?america" or bolivia or brazil or colombia or ecuador or guyana or "french?guyana" or paraguay or peru or surinam or venezuela or australia or "papua?new?guinea" or malanesia or micronesia or polynesia or "new?caledonia" or fiji or vanuatu or tonga or samoa or tahiti or "salomon?islands" or "gambier?islands" or "society?islands" or "wallis?and?futuna").af. [mots-clés utilisés dans tous les champs]
Ensemble E	E : A*B*C*D [intersections des 4 ensembles créés]

nb : \* correspond à la troncature dans un mot-clé, ? est un "joker" qui remplace un caractère

Cette recherche a donné un résultat de 214 références qui ont été triées en 6 thèmes majeurs ou compartiments environnementaux, eux même organisés en 18 sous-thèmes. Les références ont été rangées par sous-thèmes comme présentées au tableau 2. On constate, malgré l'orientation de la recherche sur le compartiment AIR, que des références sur les autres compartiments ont également été trouvées donnant une idée des grandes masses de connaissances disponibles concernant les émissions de pesticides vers l'environnement en contexte tropical. Les sous-thèmes les plus fournis sont ceux des études de dissipation et de quantification de la durée de demi-vie des molécules dans une large gamme de situations avec 80 références sur la durée de demi-vie sur les plantes, 37 sur la

durée de demi-vie dans l'eau et 125 sur la durée de demi-vie dans les sols. A noter que certaines références ont été classées dans plusieurs sous-thèmes à la fois.

Tableau 4. Références disponibles par sous-thèmes et grands thèmes/compartiments

COMPARTIMENTS/THEMES	Sous-thèmes	Nombre de publications
AIR	Air-borne dust particulates	2
	Air-borne workers health	5
	Analytical methods	6
	Atmospheric concentration in field	2
	<b>Drift (and primary distribution)</b>	<b>21</b>
	<b>Volatilization</b>	<b>17</b>
PLANTE et ALIMENT	Crop half-life	80
	Dissipation in enriched culture	3
	Treatment of pesticide residues in food	1
EAU	Leaching	3
	Water half-life	37
SOL	Soil half-life and dissipation	125
EFFICACITE PPP	Efficacy PPP	15
	Spraying material design	9
Modélisation et évaluation	<b>Models</b>	<b>2</b>
	Pesticide exposure and impacts	10
	Risk analysis	2

Compte tenu des contraintes de temps, seuls les sous-thèmes « Drift », et « Volatilization » du compartiment AIR et « models », ont été analysés et sont présentés dans les tableaux de résultats. Certaines références ont également été identifiées et analysées en complément de cette recherche par des recherches complémentaires sur certains journaux ou suite à la lecture des premières références. Les références pertinentes sont également intégrées dans notre analyse présentée dans les résultats.

### 3. Résultats : analyse de l'existant

#### Etat de l'art des mesures au champ : quelle exploitation opérationnelle ?

##### La spécificité des conditions tropicales est présente dans la littérature

Comme déjà évoqué dans l'introduction, un certain nombre d'auteurs abordent les spécificités des conditions tropicales en lien avec le transfert des pesticides vers l'environnement. Cependant, comme l'expliquent Sanchez-Bayo et Hyne (2011), la recherche sur le devenir des pesticides dans les régions tropicales est rare et ne remonte pas à plus de 3 décennies alors que la recherche sur ce thème est très active dans les pays d'Amérique du Nord et d'Europe depuis le début des années 60. Singh et al. (1991) citant Pollard (1981), expliquent également dans leur introduction que l'usage de pesticides dans les pays en développement a augmenté de façon drastique mais cette augmentation n'a pas été accompagnée d'une augmentation des travaux scientifiques sur leur devenir et leurs impacts associés. Ciglasch et al. (2006) expliquent aussi que le devenir des pesticides sous les tropiques a été peu étudié. Généralement, les durées de demi-vie des pesticides sous les tropiques semi-arides et semi-humides sont réduites par rapport aux conditions tempérées à cause des températures plus élevées qui favorise la dégradation et la volatilisation des pesticides. Dans le cadre d'une étude sur la dissipation du chlorothalonil et de ses métabolites en conditions réelles de bananeraie au Costa-Rica, Chaves et al. (2007) expliquent que l'extrapolation de données acquises dans des environnements tempérés à des environnements tropicaux peut conduire à des erreurs compte tenu des différences de conditions entre ces contextes en termes de température et d'humidité notamment.

Sanchez-Bayo et Hyne (2011) ont produit une étude intéressante qui modélise et compare les risques environnementaux associés aux pesticides entre les contextes tropicaux et non-tropicaux. Comme nous l'avons-nous-même fait, ils recensent de nombreuses études de dissipation des molécules

incluant des calculs de durée de demi-vie dans les sols et l'eau en conditions tropicales. Leur modélisation s'appuie sur un modèle de fugacité de niveau 3 dans lequel ils font varier 4 paramètres clés pour différencier les contextes tropicaux des non-tropicaux : la teneur en carbone organique du sol, le taux de dissipation des molécules dans l'eau, le taux de dissipation dans le sol et la température moyenne durant le cycle de culture. Ils sélectionnent également un jeu de pesticides dont les comportements sont supposés être différents entre les deux contextes, notamment en lien avec les paramètres pris en compte dans leur modèle comme la température qui influence la volatilité des molécules volatiles. Les grandes conclusions de cet exercice de modélisation sont intéressantes : si le niveau de risque d'exposition à une majorité de pesticides est pour eux similaire à d'autres régions, la dissipation des pesticides augmente de façon générale en conditions tropicales, conditions humides et chaudes, et l'essentiel de cette dissipation est due à l'hydrolyse dans l'eau et à la dégradation biologique dans l'eau et le sol. Les températures plus élevées favorisent également la volatilisation quand les précipitations élevées et les sols souvent plus pauvres tendent à augmenter les risques de transfert par ruissèlement et lessivage. Cette étude qui a le mérite de mener une modélisation comparée entre les deux contextes souffre cependant de certaines carences. Notamment les variables « plantes », « système de culture » et « pratiques » ne sont pas prises en compte de même que l'influence de la topographie supposée ne pas être différente entre les deux contextes.

## La dérive

Sur les 21 références initiales classées dans la rubrique « drift », moins d'une dizaine a pu être analysée. En effet, un certain nombre de références étaient écrites dans des langues autres que l'anglais ou le français : 4 en portugais (Brésil) ; 1 en espagnol (Argentine) ; 2 en chinois et certaines n'étaient pas ou plus disponibles. Certaines enfin étaient simplement hors-sujet. Au total, en incluant les autres références trouvées, 11 références sont analysées et présentées en détail dans le tableau 5. Quant aux mesures de dérive réalisées dans les DOM dans le cadre du projet OPTIBAN, celles-ci sont confidentielles et ne sont pas présentées dans ce rapport.

On constate donc le faible nombre de références trouvées qui sont dédiées partiellement ou complètement à la mesure de la dérive en conditions tropicales. De plus, sur ces 11 références, 2 seulement ont 5 ans ou moins, 1 à 10 ans ou moins, 4 ont 15 ans ou moins et 4 entre 15 et plus de 20 ans. La production scientifique identifiée est donc principalement ancienne. Concernant la répartition géographique, 4 proviennent d'Amérique Latine et Centrale (Brésil, Argentine, Mexique), 4 d'Australie, une d'Afrique du sud, une d'Inde et une des Philippines.

Les objectifs des études qui incluent une étude de la dérive sédimentaire sont :

- soit l'étude de la contamination des eaux de surface adjacentes à des parcelles traitées (Loewy et al., 2011 ; Schulz et al., 2001 ; Raupach et al., 2001) ou une analyse de risque environnemental dont la démarche est assez proche (Hernandez-Hernandez et al., 2007),
- soit des mesures comparatives de dérive selon différentes technologies en vue de faire des recommandations (Arantes Rodrigues da Cunha et al., 2003 ; Woods et al., 2001 ; Sousa Alves et Arantes Rodrigues da Cunha, 2014 ; Awadhwai et al., 1991 ; Mathew et Agnihotri, 1997) avec parfois une recherche de validation de méthode de mesure (Lee et al., 1997),
- soit encore une étude de dissipation de la molécule incluant des mesures de dérive (Kennedy et al., 1998).

La recherche du lien avec les pratiques agricoles est dans tous les cas présente.

La majorité des études est conduite au champ alors que deux publications présentent des mesures en conditions contrôlées soit en complément des mesures au champ (Arantes Rodrigues da Cunha et al., 2003) soit dans un agro-écosystème contrôlé de pois chiche (Mathew et Agnihotri, 1997). Les études concernent à la fois des vergers de fruits: pomme en Argentine (Loewy et al., 2011) ; pomme et poire en Afrique du Sud (Schulz et al., 2001), papayers au Mexique (Hernandez-Hernandez et al., 2007) ou de café (Sousa Alves et Arantes Rodrigues da Cunha, 2014) ou des plantes maraîchères comme le haricot (Arantes Rodrigues da Cunha et al., 2003), le pois chiche en conditions contrôlées (Mathew et Agnihotri, 1997) et enfin le coton pour 4 études (Woods et al., 2001 ; Lee et al., 1997 ; Kennedy et al., 1998 ; Raupach et al., 2001). Les molécules étudiées sont assez peu nombreuses, puisqu'on dénombre seulement 7 molécules actives mises en jeu avec certaines expérimentations sans matières actives du tout ou avec un traceur. La molécule la plus étudiée est l'endosulfan, insecticide très utilisé sur coton par avion et également sur vergers de pommes. La gamme des modes d'application est assez large puisqu'on trouve à la fois des pulvérisateurs motorisés, des pulvérisateurs manuels à dos et des applications aériennes par avion. Sur l'ensemble des études, seule une des publications les plus récentes cite la norme ISO de mesure de dérive sédimentaire

22866 (Sousa Alves et Arantes Rodrigues da Cunha, 2014). L'ensemble des protocoles présentés semble assez disparate avec pour chaque étude des modes de collecte et des distances de mesure de la dérive différents.

Il est intéressant de noter que 2 études utilisent des modèles de dérive mis au point en Europe et aux USA pour comparer leurs données mesurées. C'est le cas de Woods et al. (2001) sur le coton australien qui comparent leurs courbes de dérive avec les sorties du modèle américain AgDRIFT (présenté dans Guiral et al. 2016) et constatent une bonne concordance. C'est également le cas de Sousa Alves et Arantes Rodrigues da Cunha, (2014) sur le café du Brésil qui comparent leurs données avec le modèle empirique allemand de Ganzelmeier et al. (1995) et le modèle néerlandais IDEFICS de Holterman et Van de Zande (2003) (présenté dans Guiral et al. 2016) utilisant le 90<sup>ème</sup> percentile des données de dérive. Ces auteurs concluent que les deux modèles surestiment la dérive par rapport à leurs données mesurées, le modèle allemand surestimant le plus. Une des hypothèses invoquées pour expliquer cette différence est celle de l'architecture et de la morphologie des plants de café, à la fois plus denses que les arbres fruitiers européens, avec une forme cylindrique et un LAI élevé, formant ainsi une barrière physique plus efficace aux gouttelettes. Si le modèle néerlandais est jugé le plus complet et pertinent des deux modèles européens, les auteurs rappellent les précautions d'usage de ces modèles en contexte tropical compte tenu de leur mise au point en contexte tempéré.

Par ailleurs, dans une analyse de risque sur un périmètre d'irrigation au Nord de la province du Cap en Afrique du Sud (probabilités d'effet sur différents groupes écologiques) Malherbe et al. (2013) utilisent deux modèles d'analyse de risques pour 22 combinaisons de cultures-pesticides dont le premier PRIMET évalue les risques dus à la dérive des pesticides uniquement (et pas liés au ruissèlement). La dérive y est simulée par le modèle de Holterman et van de Zande (2003) IDEFICS. Cet article n'est pas présenté dans le tableau 3 parce qu'il ne présente pas de données mesurées en conditions tropicales.

Dans l'ensemble, les études présentent des courbes de dérive sédimentaire mais très rarement leur intégration sous la forme de facteurs d'émission opérationnels en pourcentage de la dose apportée. D'après Carole Sinfort, les courbes de dérive pourraient être intégrées en première approximation pour permettre une estimation du pourcentage total perdu par dérive sédimentaire par rapport à la dose apportée au champ qui peut elle aussi représenter une première approximation de la dérive aérienne. Par exemple, Birkved et Hauschild (2006) dans PESTLCI intègrent des courbes de dérive similaires jusqu'à 110 m par rapport au bord du champ pour estimer le pourcentage perdu par dérive par rapport à la dose apportée. Ils font ainsi l'hypothèse de se baser sur la dérive sédimentaire pour estimer la dérive aérienne. Il s'agit cependant d'une hypothèse forte (voir Guiral et al. 2016 pour une discussion sur ce point). Par ailleurs, d'après Carole Sinfort toujours, les pourcentages rapportés dans les publications correspondent non pas à un pourcentage absolu de pesticide par rapport à la dose apportée au champ mais à des pourcentages de quantités par unité de surface : g/cm<sup>2</sup> hors champ / g/cm<sup>2</sup> sur champ.

Tableau 5. Mesures des flux d'émission à l'application, mesure de la dérive et de la distribution primaire en contexte tropical

Référence et titre	Objectifs / contenu	Lieu, pays	Climat	Mode d'application et pesticides	Plante / système de culture	Protocole expérimental	Résultats / sorties	Commentaires/ usage
Loewy et al., 2011. Pesticide distribution in an agricultural environment in Argentina	Evaluer l'état de contamination de l'eau de drainage à partir de zones irriguées, la contribution directe de la dérive et mettre en relation les principales voies de contamination avec les pratiques agricoles	Sous bassin versant de 110 ha proche de la rivière Neuquen en Argentine	Faible humidité (précipitations moyennes annuelles < 250mm), fort ensoleillement	Pulvérisation vers le sol d'azinphos-methyl au taux de 980 g a.i./ha	Verger de pomme	Disques de Pétri déposés le long du verger dans un couloir de drainage sur trois zones : interne, intermédiaire et externe	Taux de déposition de 0,62 mg/m <sup>2</sup> pour la bande externe, 0,73 mg/m <sup>2</sup> pour la bande intermédiaire et 1,57 mg/m <sup>2</sup> pour la bande interne	Pas d'intégration proposée des taux sur l'ensemble de la surface ni de calcul de la fraction dérivée par rapport à la dose apportée à l'ha.
Arantes Rodrigues da Cunha et al., 2003. Evaluation of strategies to reduce pesticide spray drift (en portugais)	Comparaison de la dérive de fongicides en laboratoire puis au champ sur haricot selon 3 options d'application. Les technologies jouent sur l'influence de la taille des gouttes	Brésil, Etat de Sao Carlos	Vitesse de vent de 2,0 à 2,5 m s <sup>-1</sup> , température moyenne de 21 ° C et humidité relative de 85%.	Applications à partir d'un pulvérisateur à dos à buse à jet plat standard, 1) avec huile végétale émulsifiante et 2) sans et 3) avec un pulvérisateur à buse faible dérive	Haricot	Applications réalisées à la pression de 300 kPa à une vitesse de 6 km h <sup>-1</sup> , soit un volume de pulvérisation de 125 L ha <sup>-1</sup> . hauteur des buses à 50 cm de la cible. Méthodologie décrite par Wolf & Frohberg (2002), Sumner & Sumner (1999). Les cibles ont été	Densités de gouttes par disque artificiel (nombre par cm <sup>2</sup> ) aux trois distances révèlent la capacité de l'adjuvant et des buses à faible dérive à réduire la dérive hors de la zone traitée grâce à l'émission de gouttes plus grosses	Peut-être possible de déduire la quantité de produit dérivé hors de la zone avec des hypothèses sur le volume des gouttes également étudié dans le reste du papier ?

						recueillies hors de la zone cible d'application, à 5, 10 et 15 m de l'application		
Woods et al., 2001. Spray drift of Pesticides Arising from aerial application in Cotton.	Mesures au champ de dérive de gouttes d'endosulfan sur coton en Australie entre 1993 et 1998. + modélisation avec « Gaussian diffusion model » et AgDRIFT. Propositions de mesures de stratégies de réduction	Australie	Large gamme de vitesse de vent, température, humidité, stabilité atmosph.	Avion : i) ultra low volume oil-based application ii) low volume water-based application	Coton sur une large gamme de structure de culture	Disques horizontaux de papier chromatographie placés à 1m du sol	Dépôts sur feuilles de coton, sur sol, % passage de la limite du champ, % déposition sur les 500m : ULV : 60%, 25%, 14%, 7%. LV : 50%, 45%, 7%, 5%	Des références exploitables en l'état : 14% de la dose apportée quitte la frontière du champ et 2% est déposée dans les 500m au-delà de la limite du champ pour l'application dans l'huile contre 7% qui quittent le champ pour l'application dans l'eau et 1% à 500m.
Sousa Alves, G., & Arantes Rodrigues da Cunha, J.P., 2014. Field Data and prediction models of Pesticide Spray Drift on Coffee Crop	Déterminer des courbes de dérive par mesures au champ selon deux pulvérisateurs à buse à cône creux avec et sans induction d'air + comparaison avec un modèle allemand et un modèle	Brésil, Minas Gerais	Données enregistrées par station météo : T°C entre 17,2 et 27,6°C ; humidité relative de l'air : 36 à 85% ; vitesse du vent : 0,83 à 7,13 m/s	Pulvérisateurs de type cône creux avec et sans venturi : ATR 80° Orange 3.0 nozzle (traditionnel) et TVI 8002 nozzle, (faible dérive) (Albuz, France)	10 parcelles aléatoires de café sur station expérimentale – densité 3,8 x 0,7m entre plantes de 3 ans et hauteur de 2,5m. (LAI estimé à 4,38)	Dérive sédimentaire mesurée selon ISO 22866. Mesure de la dérive de rhodamine B dans de l'eau (100 mg/l) à 20 distances différentes depuis la dernière ligne traitée à l'aide de papier buvard. Les papiers sont espacés de 2,5	Pourcentages de dérive par rapport à la dose apportée aux 20 distances mesurées : exemple : à 2,5m de la dernière ligne traitée : 6,68% avec ATR contre 5,06 avec TVI La buse avec induction d'air réduit la dérive jusqu'à 20m ; Les modèles allemand et néerlandais	Il faudrait intégrer les courbes de dérive par distance pour avoir le % total de dérive par rapport à la dose apportée. Intéressante discussion sur les causes du décalage entre les mesures au champ et les sorties des modèles : en

	néerlandais					m de 2,5m jusqu'à 50m depuis le centre de la dernière ligne traitée.	surestiment la dérive aux distances proches de la zone traitée ; le modèle néerlandais apporte la meilleure prédiction	cause morphologie et densité des plants de café. Recommandent la prise en compte du type de buse dans les modèles...
Lee et al., 1997. Application of Immunoassays to Studies of The Environmental Fate of Endosulfan	Étude de validation de la fiabilité des tests d'immuno-essais pour mesurer les quantités d'endosulfan dans les sols, l'eau et la dérive, par comparaison avec la chromatographie gaz-liquide	Australie	n.a. (on parle à la fin de centaines d'échantillons de sol et d'eau analysés)	Applications simultanées par deux avions de formulations Ultra Low Volume, 250 g/l et concentré émulsifiable, EC, 350 g/l	Monoculture de coton	Utilisation de différents supports de collecte en cuivre, nylon et papier filtre sur des surfaces plates.	Effet de la formulation sur la dérive avec déposition des grosses gouttes de la formulation EC tout prêt de l'axe de l'avion alors que les petites gouttes de la formulation ULV sont retrouvées jusqu'à 100 mètres...	Courbes de dérive en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ pour les deux applications aériennes. Quelle intégration en un % total perdu par dérive ?
Awadhwai et al., 1991. Minimizing drift and exposure from knapsack sprayers	Evaluer l'efficacité d'un écran sur les lances des pulvérisateurs à dos en termes de réduction de dérive et d'exposition des travailleurs	Philippines	Plusieurs vitesses de vent sont testées : 1,25, 2,5, 3,75 et 5,75 m/s.	Application sur une surface bétonnée fermée de sulfate de cuivre dilué dans de l'eau à l'aide d'un pulvérisateur à dos avec et sans écran de protection	-	Utilisation de films polyester de 15cm par 15 accrochés sur des tableaux de 25cm de large à 1, 2, 4 et 8 m dans le vent. + procédures d'absorption atomique des pesticides rincés	Pour la gamme de vent étudiée, la lance protégée permet de réduire à la fois la dérive (de plus de 63%) et l'exposition des travailleurs (de 41-84%).	Toujours pas de valeurs totales estimées pour la dérive en fonction de la dose.
Schulz et al., 2001. Spray deposition of	Evaluer le potentiel d'apport de	Cap ouest, Afrique du	Expé AZI : vent $1,7 \text{ m.s}^{-1}$ , humidité	Application d'azinphos sur poiriers (hauteur	Azinphos appliqué sur poire	Mesure de la dérive à 0, 5, 10, 15m dans le vent	AZI expé : déposition de 31,6 ; 9,7 ; 3,5 et 1,2% de la dose	L'usage de données allemandes ou



two insecticides into surface waters in a South African orchard area	pesticides (Azinphos-methyl et endosulfan) par dérive depuis les vergers de fruits adjacents à la rivière Lourens, Afrique du Sud	sud	relative 81%, température air : 18,9°C Expé END : vent 4,5 m.s <sup>-1</sup> , 77,6 % humidité et 20,9°C	6m) avec Jacto Arbus air-assisted mist blowers (buse : J5-3 ; hauteur buse : 0,7 à 1,6m) Application d'endosulfan sur pommiers (hauteur 4,5m)	(6m de haut) et endosulfan appliqué sur pommiers (4,5m)	depuis le bord de la parcelle pour l'azinphos et à 15m pour l'endosulfan	apportée à 0, 5, 10, 15m de distance END expé : 9,1% à 15m	américaines dans une analyse de risque locale aurait conduit à une sous-estimation de l'exposition. Quelle intégration en un % total perdu par dérive ?
Mathew & Agnihotri, 1997. Fate of 14C-Deltamethrin applied to Chickpea in a Model Terrestrial Agroecosystem.	Etudier le devenir de la deltamethrine marquée dans un agro-écosystème terrestre contrôlé	Inde	Contrôlé	Application uniforme de 20,56 µCi deltamethrine marquée	Plants de pois chiche de 2 mois (environ 30cm de haut)	Séparation des résidus de pesticides par TLC et quantification par LSC dans tous les compartiments de l'agro-écosystème : plante, sol, air	Devenir sur 30 jours de la radioactivité appliquée : 63,98% dans le sol, 26,71% sur la plante, 6,85% dans l'air, 0,39% sur les murs de la chambre et 2,07 non retrouvés. Après une forte présence de radioactivité dans l'air dans les 24h suivant l'application, la concentration diminue au cours des 1 à 5 jours puis ré-augmente de façon continue	Quelle interprétation de cette concentration dans l'air ? dérive + volatilisation ? ou bien seulement volatilisation ?
Kennedy et al., 1998. Integrated Monitoring and Dissipation Studies for development of best Practice	Monitor and study the dissipation of pesticides (endosulfan) from cotton fields for developing best practices	Australia, vallée des rivières Namoi et Macquarie, New South Wales	n.d. « alkaline grey-cracking soils (vertisols) »	Applications répétées d'endosulfan (apparemment aériennes ?)	2 parcelles de coton	Suivi sur 3 ans des concentrations des 3 isomères de l'endosulfan dans des échantillons de feuille, de sol et d'eau par chromatographie en phase	Courbes de déclin des concentrations dans la feuille, dans le sol ; durée de demi-vie estimée dans le sol ; concentrations dans l'eau de ruissellement. Pas d'accumulation	L'hypothèse d'une dissipation importante par volatilisation serait confirmée par des mesures directes de concentration dans l'air au-dessus de la

Management of Chemicals used in Cotton Farming.						gazeuse et tests immuno. Les quantités déposées sur la plante et le sol (distribution primaire) ont également été évaluées	dans les sols Hypothèse d'une dissipation importante par volatilisation dans la 1 <sup>ère</sup> phase d'émission	plante mais ne donnent pas de flux quantifié précisément. L'abstract énonce une dérive de l'ordre de 5% à l'application mais on ne retrouve pas ce chiffre dans la publication.
Hernandez-Hernandez et al., 2007. Comparative ecological risks of pesticides used in plantation production of papaya : application of the SYNOPS indicator	Tester l'applicabilité du modèle SYNOPS_2 mis au point en conditions d'Europe du Nord pour l'estimation des concentrations environnementales de pesticides liées à une culture de papaye dans une région tropicale	Mexique, état du Chiapas	Tropical subhumide, avec des pluies pendant 6 mois par an, des précipitations annuelles d'environ 3200mm et une température moyenne de 27,5°C. Données météo durant l'expérimentation enregistrées toutes les 5'. (T=35,7±0,8°C ; Humidité=53,8±7,8%)	Applications par pulvérisateur 12 buses avec ventilateur turbo soit chlorothalonil seul soit un mélange de chlorothalonil, chlorpyrifos et malathion.	Vergers de papaye de densité 2800-3000 plants par ha.	Collecte des pesticides dérivés dans des bouteilles de PET contenant de l'eau distillée, positionnées à 0, 2, 5, 10, 20 et 30 m du bord de la parcelle. + validation par échantillonnage d'eau dans les fossés adjacents. Analyse des pesticides par chromatographie en phase gazeuse.	Donnent courbes de dérive du 90 <sup>ème</sup> percentile en fonction de la distance et comparent avec les courbes déduites de Ganzelmeier et al. (1995) pour arbres fruitiers	Courbes de dérive disponibles, pourraient sans doute être intégrées pour déduire un % de dérive par rapport à la dose totale apportée par ha.
Raupach et al., 2001. Endosulfan	Second papier d'une paire dont l'objectif	Australie, New South	Données météo enregistrées	Plusieurs applications d'endosulfan par	coton	Comparaison des sorties d'un modèle de	Le modèle reproduit raisonnablement bien à la fois les	

transport II : Modelling airborne dispersal and deposition by spray and vapour	général est de quantifier l'ampleur, le comportement et l'importance relative des différentes voies (dérive, transport vapeur, transport de poussières et ruissèlement) par lesquelles l'endosulfan atteint les rivières et analyser les implications des pratiques agricoles	Wales	durant les expérimentatio ns	avion sur plusieurs parcelles de coton		simulation des voies dérive et transport vapeur avec des données mesurées au champ de concentrations de pesticide sur feuilles, air, eau. Un modèle de type gaussien est utilisé pour décrire à la fois la dérive et la dispersion de vapeur	ordres de grandeur des concentrations de pesticides dans l'air et la dérive. Raisons des différences probablement liées à l'incertitude des coefficients chimiques	
---	---	-------	------------------------------------	---	--	---	---	--

Dans les années 1995-2000, plusieurs équipes australiennes ont mené des programmes de recherche ambitieux sur les différentes voies de transfert des pesticides vers les eaux et notamment vers la grande barrière de corail. Les cultures cibles étaient principalement les grandes cultures de canne à sucre et de coton sur lesquelles des pesticides étaient appliqués par voie aérienne. Une littérature assez nourrie a été produite dans ce cadre dont nous ne reprenons que quelques références les plus ciblées sur le thème de la synthèse. On notera d'ailleurs qu'un modèle nommé AGDISP a été développé pour estimer les pertes par dérive suite à des applications aériennes d'herbicide sur les productions de grandes cultures et pâturages (broadacre aerial applications) en Australie. Il a été adopté par l'APVMA (Australian Pesticides and Veterinary Medicine Authority) en préférence d'AgDrift. Ce modèle tient compte des différents types d'avions, de l'effet de l'évaporation des gouttes, de l'effet de la température et de l'humidité de l'air, de l'effet de la taille des gouttes, de la vitesse du vent et de la hauteur de la rampe d'application.

D'après Marguerite Renouf, collègue australienne, les travaux sur les voies d'exposition aérienne auraient été peu poursuivis après 2000 parce que les molécules et les modes d'application ont été adaptés de façon à réduire au maximum les risques de dérive et de volatilisation. Des articles destinés à aider les producteurs à réduire leurs pertes de pesticides par dérive ont été préparés notamment par la GRDC (Grain Research and Development Corporation). <https://grdc.com.au/Media-Centre/Ground-Cover-Supplements/Ground-Cover-Issue-122-Spray-application/Spray-drift-is-in-operators-hands>. Les leviers d'action présentés sont les suivants :

- les mélanges de produits, incluant le choix du produit et le type de formulation;
- le réglage des buses et la pression;
- La vitesse des passages
- La hauteur de la rampe
- Décider quand traiter et quand arrêter

L'on retrouve d'ailleurs ces différents leviers d'action listés dans la revue de Felsot et al. (2011) qui semblent donc représenter des leviers communs à toutes les situations qu'elles soient tropicales ou tempérées.

De même l'industrie cannière en Australie sensibilise les agriculteurs aux méthodes de réduction de la dérive ([http://www.sugarresearch.com.au/page/Growing\\_cane/Weeds/](http://www.sugarresearch.com.au/page/Growing_cane/Weeds/)). Des technologies de précision pour le traitement des mauvaises herbes ont par exemple été mises au point et sont promues telles que le WeedSeeker® qui reconnaît et traite spécifiquement les mauvaises herbes dans le champ de canne.

Il semblerait donc qu'aujourd'hui les travaux sur les transferts de pesticides en Australie se focalisent plus sur les transferts dans l'eau (Lewis et al., 2013). Ces travaux australiens des années 2000 représentent sans doute l'effort le plus poussé d'analyse et de compréhension des processus de dérive et de volatilisation en conditions tropicales avec la proposition d'un cadre de modélisation intégré des voies de transfert des pesticides jusqu'à l'eau (via l'air) (Raupach et al., 2001). Ce modèle simule les concentrations résultantes en pesticide endosulfan dans les eaux des cours d'eau d'une profondeur de 0,05m dans un rayon d'un km autour de la culture de coton au cours des premiers jours après la pulvérisation. Même si les travaux présentés peuvent paraître relativement hors-sujet par rapport à notre synthèse et surtout en termes de sorties sous la forme de concentration dans l'eau, le modèle mis au point permet de générer des courbes de dérive pour une application par avion. J'ai plus de difficultés à voir comment exploiter les données de concentrations dans l'air en termes de flux volatilisé. D'après Carole Bedos, la volatilisation est décrite par une cinétique d'ordre 1 et testée dans le cas de l'endosulfan sur coton.

### **La volatilisation**

Pratiquement aucune étude explicite sur la volatilisation n'a pu être identifiée. Seule la publication de Singh et al (1991) qui date de 25 ans mentionne explicitement dans son titre le terme. Les publications qui sortent dans la recherche bibliographique présentent des études plus larges soit sur le devenir des molécules dans l'environnement dans le cadre d'une analyse de risque par exemple, soit sur la dissipation des molécules de pesticides dans un ou plusieurs compartiments. Les plus nombreuses publications concernent la dissipation dans les sols, et un nombre important concernent la dissipation dans la plante et dans l'eau. A priori ces publications sur la dissipation peuvent évoquer le processus de volatilisation parmi les processus en jeu dans la disparition des molécules mais probablement très peu ont réellement quantifié ce flux.

Seuls les papiers ayant le mot volatilisation dans l'abstract ont été sélectionnés dans la rubrique volatilisation soit 17 au total mais très peu ont pu être analysées encore une fois. Certaines ne sont pas disponibles, d'autres sont en langues étrangères autres que français et anglais, d'autres sont

hors-sujet présentant par exemple des études de concentrations dans l'air pour l'étude de l'exposition des travailleurs (Albrecht et Chenchin, 1985) ou présentant des études dans des contextes non-tropicaux, d'autres enfin ne mentionnent le terme volatilisation dans l'abstract que de façon générique sans présenter de mesures de ce flux.

Dans le tableau 6, les aspects ayant trait à la volatilisation retrouvés dans 4 papiers sont analysés plus en détail. Comme pour la dérive, ces références sont anciennes : aucune n'a moins de 5 ans, une référence a 10 ans ou moins, une a entre 15 et 20 ans et une a plus de 20 ans. Elles concernent le Brésil, la Thaïlande, la Jamaïque et l'Australie. Deux études sont réalisées en conditions contrôlées de laboratoire et deux présentent des mesures en conditions réelles au champ. Les cultures concernées sont variées puisqu'on trouve une rotation au Brésil de maïs-soja-pâturage et une pâture simple, des arbres à litchis en Thaïlande et du coton en Australie. L'expérimentation en condition contrôlée de Singh et al. (1991) était sans plante. Si l'étude australienne se focalise encore une fois sur l'endosulfan, Laabs et al. (2002) étudient en laboratoire la dégradabilité de 7 pesticides contrastés (voir tableau 4), Ciglash et al. (2006) étudient en vergers de litchis Thaï la dissipation d'un cocktail de pesticides et Singh et al. (1991) étudient en laboratoire les cinétiques de volatilisation, hydrolyse et photolyse de 3 organochlorés persistants largement utilisés en Jamaïque : Dieldrin et  $\alpha$ - et  $\beta$ -Endosulfan. Cette dernière molécule est donc encore une fois étudiée dans 2 études sur 4.

En termes de facteurs d'émission opérationnels, 2 études sur 4 proposent des pourcentage de flux en fonction de la dose apportée (Laabs et al., 2002 ; Singh et al., 1991). Par exemple, les plus forts pourcentages de flux volatilisés depuis le sol par Laabs et al. (2002) après 80 jours d'incubation sont de 4% pour le sol 1 et 13% pour le sol 2 pour la trifluraline. Ces pourcentages sont négligeables pour l'alachlor et la simazine. Singh et al. (1991) trouvent un pourcentage de flux volatilisé depuis le sol de 30% la première semaine pour l'apport de 1kg a.i./ha d'endosulfan et 20% pour la même dose de dieldrin. Cependant, ces derniers ne discutent pas de la valeur de leur estimation en conditions contrôlées par rapport à une situation réelle au champ.

### **Exhaustivité et valorisation du fond documentaire**

Notre synthèse ne prétend pas à l'exhaustivité. Malgré la rigueur des méthodes de recherche bibliographiques employées, certaines références n'ont pas été identifiées. La recherche complémentaire menée ponctuellement sur certains journaux nous l'a démontré et il n'était pas possible dans le temps imparti de suivre toutes les nouvelles références citées par les publications identifiées. De plus, si nous avons focalisé la valorisation du fond documentaire sur les thèmes de la synthèse, il est possible que certaines publications classées dans d'autres thèmes aient pu être intéressantes pour notre synthèse. Une grande quantité de travaux est classée dans le thème dissipation or l'on sait que ce thème intègre tous les mécanismes de disparition des molécules dans un compartiment. Même si la majorité de ces travaux se fait par mesure de concentration dans le compartiment d'étude et que ceux-ci ne donnent généralement pas la contribution de chaque mécanisme de disparition tel que dérive ou volatilisation, on peut raisonnablement penser que certaines études non identifiées auraient pu apporter des compléments intéressants.

Tableau 6. Mesures des flux de pesticides volatilisés en post-application

Référence et titre	Objectifs / contenu	Lieu, pays	Climat	Mode d'application et pesticides	Plante / système de culture	Protocole expérimental	Résultats / sorties	Commentaires/ usage
Laabs et al., 2002. Fate of <sup>14</sup> C-Labeled Soybean and Corn Pesticides in Tropical Soils of Brazil under Laboratory Conditions	Etude en laboratoire de la dégradabilité des pesticides et de leurs métabolites dans deux sols tropicaux contrastés du Brésil + comparaison des taux de dissipation en labo avec données au champ de la littérature	Brésil, sols du Mato Grosso	Conditions contrôlées	7 pesticides représentant un large spectre : alachlor, chlorpyrifos, deltaméthrin, endosulfan, monocrotophos, simazine, trifluralin	1 sol sous rotation de maïs-soja-pâture et un sol en pâture	Sols incubés à une humidité similaire des conditions au champ (40% de la capacité au champ) et à 30°C (± 1°C) dans le noir + pesticides à leur dosage max recommandé, sauf deltaméthrine appliquée à une dose 10 fois supérieure due à sa faible radioactivité. Aux jours 0, 2, 4, 8, 18, 28, 50 et 80, détermination de la radioactivité dans le sol, dans la laine de verre et la soude caustique du système d'incubation	Donnent les % de la radioactivité appliquée sous forme volatilisée pour les 7 pesticides, le plus fort étant pour trifluralin avec 4% pour le sol 1 (Ustox) et 13% pour le sol 2 (Psammets) ; ces % étant négligeables pour alachlor et simazine. Trouvent une persistance des pesticides plus courte dans leur expérimentation à 30° que dans des expé à une température inférieure (fonction de Arrhenius : DT50 des pesticides augmente d'un facteur 1,5 par 5°C de baisse de la température d'incubation) Une dissipation plus rapide ou égale en conditions au champ est constatée et peut être due à des pertes physiques plus grandes et à une meilleure volatilisation.	Donnent une estimation (plutôt basse) de la volatilisation depuis le sol sous la forme d'un % de la dose appliquée pour 7 pesticides contrastés en conditions tropicales. Cela représente une référence exploitable en l'état mais correspondant à des conditions contrôlées.
Ciglasch et al., 2006.	Evaluer l'influence	Nord de la	Climat de mousson	5 applications consécutives à 10	Arbres à litchis	Prélèvements d'échantillons	Calculent des durées de demi-vie des pesticides dans	Bien que la volatilisation soit

Insecticide Dissipation after repeated Field application to a Northern Thailand Ultisol	sur la dissipation des pesticides d'applications répétées d'insecticides (organochlorés et organophosphorés) en vergers de litchi Thai	Thaïlande	avec une saison sèche et une saison humide prononcées T°C et précipitations moyennes : 21,6°C et 1600mm	jours d'intervalle par pulvérisateur à dos d'un cocktail de pesticides directement sur le sol enherbé du verger (pour minimiser la dérive et assurer une application homogène). Les doses apportées excèdent les doses recommandées par un facteur 3 à 5 pour assurer la détection des pesticides dans le sol.	d'environ 2,5m de haut	de sol les jours 1, 3, 5, 7 et 10 après l'application	le sol, parmi les plus courtes de la littérature en lien avec l'humidité du climat. Ne montrent pas l'effet adaptatif de la vie microbienne du sol sur la dégradation des molécules à cause de l'effet prépondérant des facteurs environnementaux. Prétendent que la volatilisation est une voie de dissipation majeure (incluant la volatilisation depuis le couvert végétal), particulièrement pour mevinphos et malathion, mais sans preuve tangible dans le papier	présentée comme un processus majeur de dissipation, pas de FE de volatilisation disponibles...
Singh et al., 1991. Dynamics of pesticides in Tropical Conditions. 1. Kinetic Studies of Volatilization , Hydrolysis, and Photolysis of Dieldrin and $\alpha$ - and $\beta$ - Endosulfan	Production des courbes de cinétiques de volatilisation, hydrolyse et photolyse de 3 organochlorés persistants largement utilisés en Jamaïque : Dieldrin et $\alpha$ - and $\beta$ - Endosulfan.	Jamaïque	Conditions contrôlées de laboratoire		Pas de plante	Mesure du flux volatilisé avec un piège au solvant à partir de disques de pétri exposés à l'atmosphère sur le toit du labo (soit à l'ombre soit sous la lumière directe du soleil) ou sous une hotte aspirante	Donnent les constantes et les équations des cinétiques de la volatilisation selon les deux méthodes. Estiment également les taux de pesticides volatilisés rapportés à l'hectare et en % de la dose appliquée soit 30% la 1 <sup>ère</sup> semaine pour 1kg a.i. /ha d'endosulfan et 20% pour la même dose de dieldrin	Donnent des FE utilisables mais sans discussion de la valeur de leur extrapolation entre les conditions contrôlées et le champ ??
Kennedy et al., 1998. Integrated Monitoring	Monitor and study the dissipation of pesticides	Australie, vallée des rivières	n.d. « alcaline grey- cracking	Applications répétées d'endosulfan (apparemment	2 parcelles de coton	Suivi sur 3 ans des concentrations des 3 isomères	Courbes de déclin des concentrations dans la feuille, dans le sol ; durée de demi-vie estimée dans le	L'hypothèse d'une dissipation importante par volatilisation

and Dissipation Studies for development of best Practice Managemen t of Chemicals used in Cotton Farming.	(endosulfan) from cotton fields for developing best practices	Namoi et Macqua rie, New South wales	soils (vertisols) »	aériennes ?)		de l'endosulfan dans des échantillons de feuille, de sol et d'eau par chromatograp hie en phase gazeuse et tests immuno. Les quantités déposées sur la plante et le sol (distribution primaire) ont également été évaluées	sol ; concentrations dans l'eau de ruissèlement. Pas d'accumulation dans les sols Hypothèse d'une dissipation importante par volatilisation dans la 1 <sup>ère</sup> phase d'émission	serait confirmée par des mesures directes de concentration dans l'air au- dessus de la plante mais ne donnent pas de flux quantifié précisément. L'abstract énonce une dérive de l'ordre de 5% à l'application mais on ne retrouve pas ce chiffre dans la publication.
--	--	---	------------------------	--------------	--	---	---	---



## **Analyse de la validité des modèles existants pour les conditions tropicales**

Les voies de transfert des pesticides vers l'atmosphère ainsi que les facteurs influençant ces mécanismes sont aujourd'hui connus (Guiral et al., 2016). Concernant la dérive, il s'agit dans l'ordre : 1) des technologies et des pratiques de pulvérisation, 2) des conditions météorologiques, 3) des caractéristiques de la bouillie. Pour la volatilisation, il s'agit 1) des caractéristiques des matières actives et des formulations, 2) des pratiques agricoles, 3) des conditions de surface (sol ou couvert végétal) et 4) de la météorologie locale. Nous avons montré dans notre synthèse que les systèmes de production végétale en contexte tropical présentent des caractéristiques spécifiques sur l'ensemble de ces aspects. On est donc en droit d'attendre un comportement des molécules de pesticides spécifique et surtout différent de leur comportement en contexte de production végétale tempérée.

Trois grands types d'approches ont été répertoriés dans la synthèse de l'INRA : des facteurs d'émission, des relations simples et des modèles. Parmi les modèles, on trouve des modèles empiriques et des modèles mécanistes. Je réorganiserai donc ces différents types en facteurs d'émissions, relations et modèles empiriques et modèles mécanistes pour en évaluer la validité et les marges de progrès en contexte tropical. Je traiterai pour finir les modèles d'estimation des flux de pesticides au champ employés en ACV, en particulier le modèle PestLCI.

### **Facteurs d'émission**

Les facteurs d'émission, s'ils sont simples d'utilisation ont été obtenus dans des contextes strictement tempérés et même dans ces contextes, leur niveau de validation a été jugé faible. On peut donc aisément conclure qu'ils n'ont pas plus de validité en contexte de production végétale tropicale qu'en contexte tempéré.

### **Relations et modèles empiriques**

Les relations et modèles empiriques présentent un gradient de complexité, depuis de simples outils de classification des molécules et ne tenant pas compte des conditions météorologiques, jusqu'à des outils permettant d'estimer des flux et intégrant plus de variables. Dans la mesure où ils s'abstraient par construction du contexte pédoclimatique, les outils de classification peuvent être intéressants en contexte tropical également pour hiérarchiser les risques associés aux molécules actives en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques mais ne pourront pas générer des flux.

Les relations et les modèles empiriques qui intègrent dans une certaine mesure les variables de climat, de sol et de pratiques ne sont, par construction, valides que dans des contextes de production végétale tempérée dans lesquelles leurs relations ont été établies à partir de données mesurées. Leur validité est donc sujette à caution dans des contextes trop éloignés de leur domaine de validité d'origine, en particulier en contexte tropical. Si Woods et al. (2001) trouvent une concordance honorable entre leurs données de dérive sur coton australien avec les sorties du modèle américain AgDRIFT, Sousa Alves et Arantes Rodrigues da Cunha, (2014) au contraire identifient un gap important entre leurs données de dérive sur le café du Brésil et les sorties du modèle empirique allemand de Ganzelmeier et al. (1995) et le modèle néerlandais de Holterman et Van de Zande (2003).

### **Modèles mécanistes**

Concernant les modèles mécanistes, ceux-ci ont en théorie une validité universelle puisqu'ils intègrent les formalismes qui gouvernent les processus d'émission. Cependant, ces modèles restent aujourd'hui limités par l'état des connaissances et par le nombre et le degré de complexité des processus pris en compte. En ce qui concerne la volatilisation, ils pourront modéliser l'effet des variables météorologiques clés comme la température, l'humidité, le vent mais la plupart d'entre eux ne pourra pas rendre compte actuellement de couverts végétaux structurés en rang et inter-rangs puisqu'ils ont été essentiellement mis au point sur grandes cultures. Ils pourraient du coup être testés sur des couverts végétaux tropicaux homogènes comme la canne à sucre par exemple ou des céréales tropicales. Une autre limite importante de ces modèles provient de l'absence le plus souvent d'une description fine de la plante cultivée. Or l'on a vu que les plantes cultivées tropicales peuvent avoir des spécificités importantes en termes de morphologie, architecture, texture et surface des feuilles, mécanismes de résistance à la sécheresse etc.. qui auront une influence sur les flux volatilisés depuis les feuilles notamment. Une autre limite importante des modèles mécanistes actuels est leur prise en

compte très réduite de la complexité des modes d'application ce qui est déterminant notamment pour la dérive. Un flux de pesticide apporté par un pulvérisateur manuel à dos, très utilisé dans les pays d'Afrique, Asie et Amérique, n'aura pas du tout la même sensibilité à la dérive qu'un flux généré par un pulvérisateur ventilé tel qu'on en trouve en Europe ou a fortiori par un avion. Enfin, les modèles mécanistes actuels ne peuvent pas simuler des conditions de parcelles en pente ni d'ailleurs reproduire les dynamiques microbiennes propres aux sols tropicaux.

Parce que les modèles mécanistes disponibles sont encore dans une phase d'évolution et n'ont pas encore atteint leur pleine maturité scientifique, on peut conclure que leur usage en contexte tropical nécessitent pour le moins des tests spécifiques voire des adaptations sauf dans des conditions se rapprochant beaucoup des conditions pour lesquelles ils ont été testés, grandes cultures tempérées en termes de pratiques d'application et de couvert végétal pour la volatilisation ou de la viticulture pour la dérive.

### **Modèles d'estimation des flux de pesticides au champ utilisés en ACV : le modèle PestLCI**

Nous avons présenté de façon détaillée les formalismes du modèle PestLCI dans le rapport de Guiral et al. (2016). Ce modèle présente l'avantage d'offrir un cadre d'estimation de l'ensemble des flux de pesticides apportés à la parcelle à la fois exhaustif en termes de flux et permettant d'équilibrer le bilan de masse des molécules. Les choix de formalismes qui y sont faits sont en phase avec cette ambition. Comme résumé dans la conclusion du rapport de Guiral et al., « le modèle PestLCI utilise un modèle de dérive sédimentaire pour approcher la dérive aérienne, un modèle de fugacité pour la volatilisation depuis le sol et des relations simples pour la volatilisation depuis la plante. La limite de ces outils est celles des sous-modèles implémentés ». Ce modèle est utilisé dans le cadre de l'initiative internationale « Pesticide Consensus Building Workshop » pour générer des facteurs d'émission pour des scénarios d'apports sur l'ensemble des cultures et dans l'ensemble des contextes pédoclimatiques du monde. Même si ce modèle doit être actualisé, ses formalismes fondamentaux demeureront les mêmes. Les relations employées pour la dérive et pour la volatilisation depuis les feuilles restent des relations empiriques établies soit en conditions contrôlées soit en conditions de grandes cultures tempérées. De plus, un certain nombre de modes d'application des régions tropicales ne sont pas disponibles dans le modèle. Au final, le modèle PestLCI aura sans doute besoin d'adaptations plus importantes qu'anticipées à l'origine par ses concepteurs si l'on veut pouvoir lui donner une validité raisonnable en conditions tropicales.

## **4. Conclusion et perspectives de recherche**

La connaissance sur les mécanismes de transfert des pesticides en contexte tropical est trop lacunaire. Nous avons montré que la production scientifique dans ce domaine était modeste et ancienne. La recherche dans ce domaine apparaît d'autant plus importante pour la question des émissions vers l'air que les pays du sud continuent d'utiliser ou utilisent de plus en plus, des molécules anciennes, à la fois toxiques et souvent encore très volatiles pendant que les forces de recherche en conditions tropicales notamment présentes dans les laboratoires australiens s'intéresseraient moins à la problématique des flux dans l'air d'après Marguerite Renouf (progrès réalisés dans le domaine, priorités d'action...). Cette synthèse ouvre sur deux phases de recherche pour combler ces lacunes qui représentent des perspectives à moyen et long termes.

La première phase de recherche doit concerner l'acquisition de connaissances par la mesure de flux dans une gamme de contextes de production végétale tropicale contrastés.

Sur la base de ces nouvelles connaissances, des modèles intégrant plus de formalismes importants pour les contextes tropicaux pourront être mis au point et validés afin de conduire à des recommandations en termes de pratiques agricoles et de choix des molécules.

En parallèle voire en préambule de ces phases, il apparaît qu'un effort conséquent de formation et de sensibilisation des acteurs doit être mené sur les risques et dangers associés à l'usage des pesticides que ce soit pour l'environnement, la santé des consommateurs et surtout celle des travailleurs.

## 5. Références bibliographiques

- Abate, T, van Huis, A, Ampofo, JKO, 2000. Pest Management Strategies in Traditional Agriculture: An African Perspective. *Annual Review of Entomology* 45: 631-659
- Ahouangninou, C, Fayomi, BE, Martin, T, 2011. Evaluation des risques sanitaires et environnementaux des pratiques phytosanitaires des producteurs maraîchers dans la commune rurale de Tori-Bossito (Sud-Bénin). *Cahiers d'Agriculture* 20 : 216-222. doi : 10.1684/agr.2011.0485
- Ahouangninou, C, Martin, T, Edorh, P, Bio-Bangana, S, Samuel, O, St-Laurent, L, Dion, S, Fayomi, BE, 2012. Characterization of health and environmental risks of pesticide use in market-gardening in the rural city of Tori-Bossito in Benin, West Africa. *Journal of Environmental Protection* 3: 241–248. doi: 10.4236/jep.2012.33030
- Albrecht, W. N., et K. Chenchin. 1985. "Dissipation of 1,2-Dibromo-3-Chloropropane (DBCP), Cis-1,3-Dichloropropene (1,3-DCP), and Dichloropropenes from Soil to Atmosphere." *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 34(6): 824–31.
- Arantes Rodrigues da Cunha, J. P. A. R., Teixeira, M.M., Coury, J.R., Ferreira, L.R., 2003. Evaluation of strategies to reduce pesticide spray drift. [Portuguese]. *Planta Daninha* 21(2), 325-332.
- Awadhwai, N.K., Cabrido, E.F., Quick, G.R., 1991. Minimizing drift and exposure from knapsack sprayers. *J. Environ. Sci., Health*, B26(5&6) : 589-600.
- Birkved, M., et M. Z. Hauschild. 2006. « PestLCI—A Model for Estimating Field Emissions of Pesticides in Agricultural LCA ». *Ecological Modelling* 198 (3-4): 433-51. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.05.035.
- Boussier, J., 2015. Evaluation des pressions agricoles dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau : contribution au développement d'une méthodologie dans les conditions spécifiques de l'île de la Réunion. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'AgroParisTech. 80 pages.
- Bruchon, L., Le Bellec, F., Vannière, H., Ehret, P., Vincenot, D., De Bon, H., Marion, D., Deguine, J-P., 2015. Guide tropical – Guide pratique de conception de systèmes de culture tropicaux économes en produits phytosanitaires. Le Bellec F. (Ed.), CIRAD, Paris, 210p.
- Chaves, A., Shea, D., Cope, G.W., 2007. Environmental fate of chlorothalonil in a Costa Rican banana plantation. *Chemosphere* 69: 1166-1174.
- Ciglasch, H., J. Busche, W. Amelung, S. Totrakool, and M. Kaupenjohann, 2006. "Insecticide Dissipation after Repeated Field Application to a Northern Thailand Ultisol." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2006 Nov 54(22): 8551–59.
- Cissé, I, Tandia, AA, Fall, ST, Diop, EHS, 2003. Usage Incontrôlé des Pesticides en Agriculture Périurbaine: Cas de la Zone de Niayes au Sénégal. *Cahiers Agricultures* 12(3): 181-186
- Cissé, O, Gueye, NFD, Sy, M, 2005. Institutional and legal aspects of urban agriculture in French-speaking West Africa: from marginalization to legitimization. *Environment and Urbanization* 17: 143-154
- De Bon, H, Parrot, L, Moustier, P, 2010. Sustainable urban agriculture in developing countries. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30: 21–32. doi: 10.1051/agro:2008062
- De Bon, H, Huat, J, Parrot, L, Sinzogan, A, Martin, T, Malézieux, E, Vayssières, J-F, 2014. Pesticide risks from fruit and vegetable pest management by small farmers in sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development* (online first). Doi: 10.1007/s13593-014-0216-7.
- Eriksen-Hamel, N, Danso, G, 2010. Agronomic considerations for urban agriculture in Southern cities. *International Journal of Agricultural Sustainability* 8 (1&2): 86-93.
- Felsot, A.S. , Unsworth, J.B. , Linders, J.B.H.J., Graham, R., Rautman, D., Harris, C., Carazo, E., 2011. Agrochemical spray drift; assessment and mitigation—A review. [J Environ Sci Health B](#). 2011;46(1):1-23. doi: 10.1080/03601234.2010.515161.
- FAO, 2012. Growing greener cities in Africa. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Ganzelmeier, H., Rautmann, D., Spangenberg, G.R., Streloke, M., Herrmann, M., Wenzelburger, H.-J., Walter, H.-F., 1995. Studies on the spray drift of plant protection products: results of a test program carried out throughout the Federal Republic of Germany. Berlin: Blackwell, 111p.
- Guiral, C., Bedos, C., Ruelle, B., Basset-Mens, C., Douzals, J-P., Cellier, P., Barriuso, E., 2016. Synthèse bibliographique sur les émissions de produits phytopharmaceutiques dans l'air - Facteurs

d'émissions, outils d'estimation des émissions, évaluations environnementales et perspectives de recherche. Rapport final pour l'ADEME, 201p.

- Holterman, H.J.; van de Zande, J.C. 2003. IMAG Drift Calculator v1.1: user manual. Available at: <<http://www.pesticidemodels.eu/sites/www.pesticidemodels.eu/files/documents/IDCmanual.pdf>>.
- Gogo, EO, Saidi, M, Itulya, FM, Martin, T, Ngouajio, M, 2014. Eco-Friendly Nets and Floating Row Covers Reduce Pest Infestation and Improve Tomato (*Solanum lycopersicon* L.) Yields for Smallholder Farmers in Kenya. *Agronomy* 4: 1-12. doi:10.3390/agronomy4010001.
- Hernandez-Hernandez, C. N. A., J. Valle-Mora, A. Santiesteban-Hernandez, and R. Bello-Mendoza. 2007. "Comparative Ecological Risks of Pesticides Used in Plantation Production of Papaya: Application of the SYNOPSIS Indicator." *Science of the Total Environment* 381(1/3): 112–25.
- Ingwersen, WW, 2012. Life cycle assessment of fresh pineapple from Costa-Rica. *Journal of Cleaner Production* 35: 152-163
- Kennedy, I. R., F. Sanchez-Bayo, S. W. L. Kimber, N. Ahmad, H. Beasley, N. Lee, S. Wang, and S. Southan. 1998. "Integrated Monitoring and Dissipation Studies for Development of Best Practice Management of Chemicals Used in Cotton Farming." *ACIAR Proceedings Series*, 85: 88–99.
- Laabs, V., Amelung, W., Fent, G., Zech, W., Kubiak, R., 2002. Fate of <sup>14</sup>C-Labeled Soybean and Corn Pesticides in Tropical Soils of Brazil under Laboratory Conditions. *J. Agric. Food Chem.* 50: 4619-4627.
- Lee, N., Beasley, H.L., Kimber, S.W.L., Silburn, M., Woods, N., Skerritt, J.H., Kennedy, I.R., 1997. Application of Immunoassays to Studies of the Environmental Fate of Endosulfan. *J Agric Food Chem.* 45:4147-4155.
- Lefèvre, P., 2015. Evaluation des Pressions Agricoles dans le cadre de la Directives Cadre sur l'Eau dans les Départements d'Outre-Mer – Cas de la Martinique. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur en agriculture à LaSalle Beauvais. 110 pages
- Lewis, S.E., Silburn, D.M., Shaw, M., Davis, A., O'Brien, D.S., Oliver, D., Brodie, J.E., Andersen, J.S., Kookana, R. Fillols, E., Rojas-Ponce, S., McHugh, J., Baillie, C., 2013. Pesticides in the sugarcane industry: an evaluation of improved management practices. Report to the Reef Rescue Water Quality Research & Development Program. Reef and Rainforest Research Centre Limited, Cairns (28pp.).ISBN: 978-1-925088-21-2
- Loewy, R.M., Monza, L. B., Kirs, V.E., Savini, M.C., 2011. Pesticide distribution in an agricultural environment in Argentina. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 46:8, 662-670
- Maistre A., 2015. Evaluation des pressions agricoles dans le cadre de la Directives Cadre sur l'Eau dans les Départements d'Outre-Mer – Cas de la Guadeloupe. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Agriculture à LaSalle Beauvais, 94 pages
- Malherbe, W., van Vuren, J.H.J., Wepener, V., 2013. Preliminary risk assessment of common-use pesticides using PRIMET and PERPEST pesticide risk models in a semi-arid subtropical region. *Water SA* 39(5):599-609. Doi:10.4314/wsa.v39i5.3.
- Mathew, S., and N. P. Agnihotri. 1997. "Fate of <sup>14</sup>C-Deltamethrin Applied to Chickpea in a Model Terrestrial Agroecosystem." *Pesticide Research Journal* 9(1): 46–53.
- Orsini, F, Kahane, R, Nono-Womdim, R, Gianquinto, G, 2013. Urban agriculture in the developing world: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 33:695–720. doi: 10.1007/s13593-013-0143-z
- Perrin, A, 2013. Evaluation environnementale des systèmes agricoles urbains en Afrique de l'Ouest : Implications de la diversité des pratiques et de la variabilité des émissions d'azote dans l'Analyse du Cycle de Vie de la tomate au Bénin. Thèse de doctorat AgroParisTech – Sciences agronomiques et écologiques. 176p.
- Raupach, M. R., P. R. Briggs, N. Ahmad, and V. E. Edge. 2001. "Endosulfan Transport: II. Modeling Airborne Dispersal and Deposition by Spray and Vapor." *Journal of Environmental Quality* 30(3): 729–40.
- Sanchez-Bayo, F., Hyne, R.V., 2011. Comparison of Environmental Risks of Pesticides Between Tropical and Nontropical Regions. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(4): 577-586.
- Schulz, R., Peall, S.K.C., Dabrowski, J.M., Reinecke, A.J. 2001. Spray Deposition of Two Insecticides into Surface Waters in a South African Orchard Area. *Journal of Environmental Quality* 2001 30: 3: 814-822. doi:10.2134/jeq2001.303814x
- Singh, N.C., T.P. Dasgupta, E.V. Roberts, and A. Mansingh., 1991. "Dynamics of Pesticides in Tropical Conditions. 1. Kinetic Studies of Volatilization, Hydrolysis, and Photolysis of Dieldrin and Alpha- and Beta-Endosulfan." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 39(3): 575–79.

- Sousa Alves, G., & Arantes Rodrigues da Cunha, J.P., 2014. Field Data and prediction models of Pesticide Spray Drift on Coffee Crop. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasilia, 49(8):622-629. DOI: 10.1590/S0100-204X2014000800006.
- Taylor, RAJ, Shalevet, S, Spharim, I, Berlinger, MJ, Lebiush-Mordechi, S, 2001. Economic evaluation of insect-proof screens for preventing tomato yellow leaf curl virus of tomatoes in Israel. *Crop Protection* 20 : 561-569
- Traoré, SK, Mamadou, K, Dembele, A, Lafrance, P, Mazellier P, Houenou, P, 2006. Contamination de l'Eau Souterraine par les Pesticides en Régions Agricoles en Côte-d'Ivoire (Centre, Sud et Sud Ouest). *Journal Africain des Sciences de l'Environnement* 1 : 1-9.
- United Nations, 2012. World Population Prospects: The 2012 Revision. <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>.
- Weinberger, K, Lumpkin, T, 2007. Diversification into horticulture and poverty reduction: A research agenda. *World Development* 35(8), 1464-1480.
- World Bank, 2013. Urban Agriculture - Findings from Four City Case Studies. n. 18, The World Bank Group, Washington, USA
- Woods, N., Craig, I.P., Dorr, G., Young, B., 2001. Spray drift of pesticides arising from aerial application in cotton. *J Environ Qual* 30:697-701.

## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)